

**LASER CONTROLLED MATERIAL-PROCESSING SYSTEM**

Publication number: JP2002316278

Publication date: 2002-10-29

Inventor: PATEL RAJESH S

Applicant: IMRA AMERICA INC

Classification:

- international: B23K26/00; B23K26/06; B23K26/14; B23K26/36;  
C03C23/00; B23K26/00; B23K26/06; B23K26/14;  
C03C23/00; (IPC1-7): B23K26/00; B23K26/06;  
B23K26/14; C03C23/00

- European: B23K26/06B4B; B23K26/36

Application number: JP20020031756 20020208

Priority number(s): US20010779652 20010209

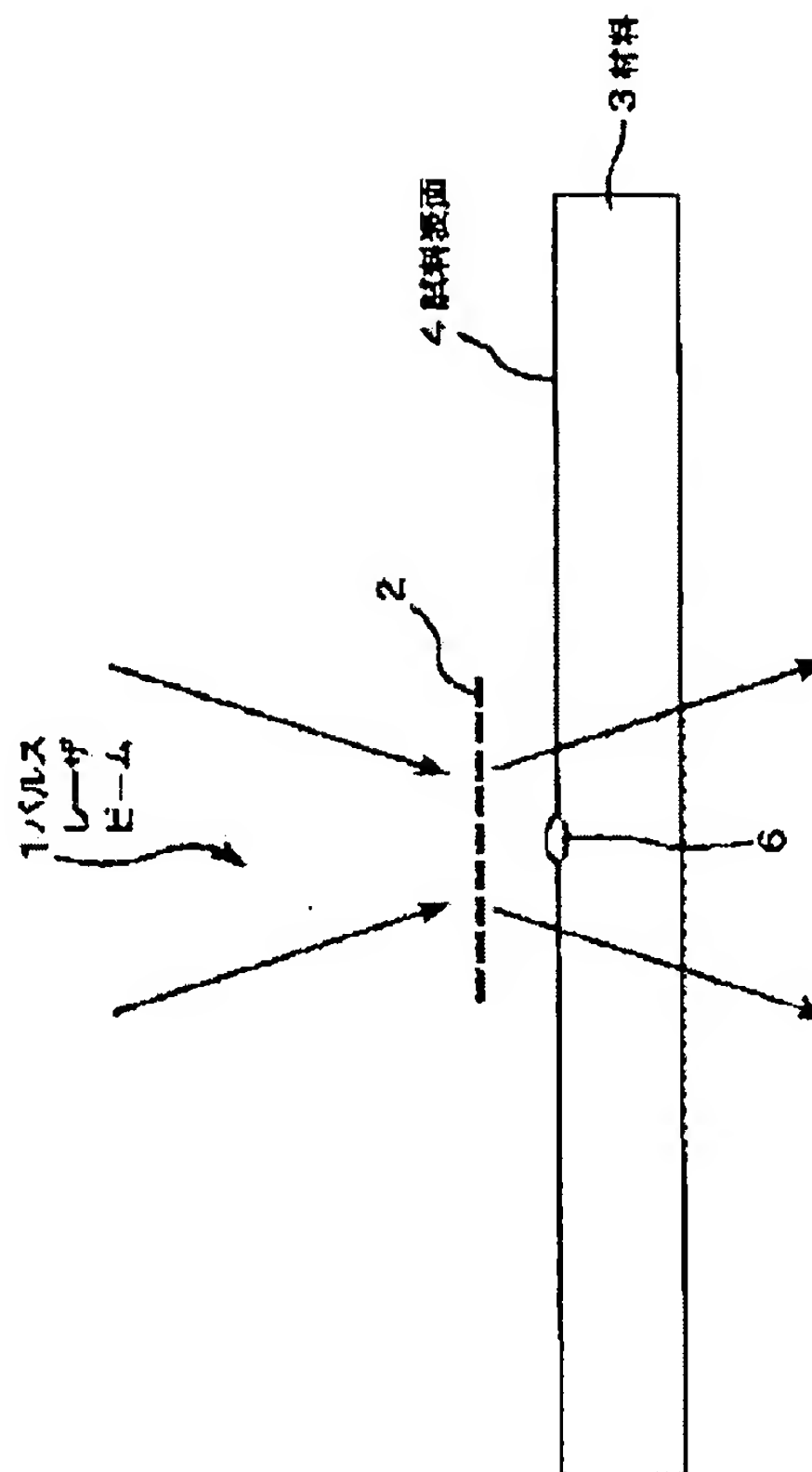
Also published as:

US2003057192 (A1)  
US2002108938 (A1)  
DE10205351 (A1)

Report a data error here

**Abstract of JP2002316278**

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To provide a material-processing system using a pulsed laser for the purpose of removing a material to make a clean microfabrication surface. **SOLUTION:** The material-processing system using a pulsed laser is composed of a process for generating a pulsed laser beam, a process for converging the beam on a plane above the surface of a sample, a process for causing breakdown of the material at a point to be irradiated with the laser beam, and a process for removing or reforming the material of the sample. Arranging a focal plane above the sample permits the use of a pulsed laser beam of higher intensity, minimizing the adverse effect on the condition of the sample surface for laser energy absorption. In the secondary aspect, the material-processing system further includes the utilization of vacuum for removing the beam-processed material desirably by means of a push/pull type air vacuum system arranged slightly above the surface of the sample, thereby providing a clean sample and surface for operation.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2002-316278

(P2002-316278A)

(43)公開日 平成14年10月29日(2002. 10. 29)

(51)Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テーマト*(参考)
B 2 3 K 26/00		B 2 3 K 26/00	E 4 E 0 6 8
26/06		26/06	J 4 G 0 5 9
26/14		26/14	A
C 0 3 C 23/00		C 0 3 C 23/00	D

審査請求 未請求 請求項の数14 O L 外国語出願 (全 19 頁)

(21)出願番号 特願2002-31756(P2002-31756)

(22)出願日 平成14年2月8日(2002. 2. 8)

(31)優先権主張番号 0 9 / 7 7 9 , 6 5 2

(32)優先日 平成13年2月9日(2001. 2. 9)

(33)優先権主張国 米国 (U S)

(71)出願人 593185670

イムラ アメリカ インコーポレイテッド  
アメリカ合衆国 ミシガン州48105 アン  
アーバー ウッドリッジ・アベニュー1044

(72)発明者 ラジェッシュ・エス・パテル

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 フリ  
ーモント カトーロード48834番地

(74)代理人 100081776

弁理士 大川 宏

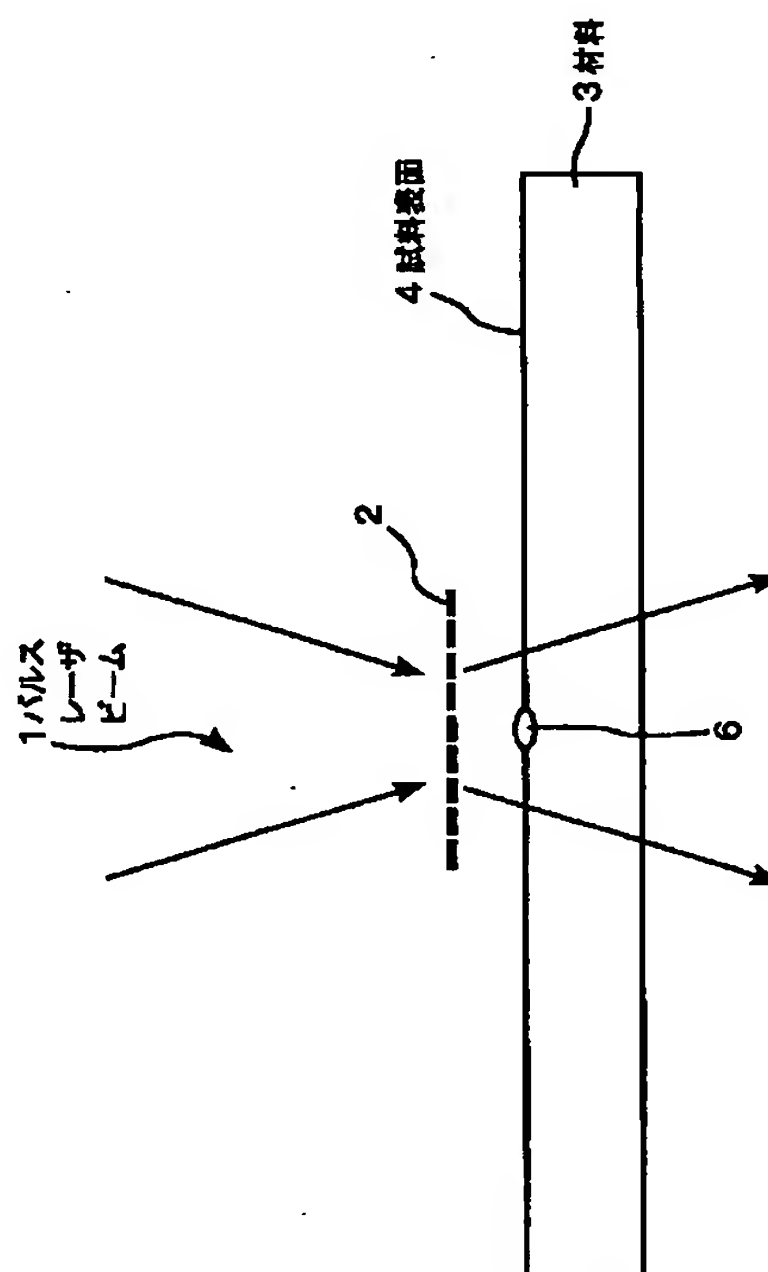
Fターム(参考) 4E068 AH00 CA01 CD10 CG01 CG02  
CH08 CJ01

4G059 AA01 AA08 AB00 AB05 AC30

(54)【発明の名称】 レーザ制御材料処理方法

(57)【要約】

パルスレーザを使用する材料処理方法は、レーザパルスビームを発生する工程と、試料の表面の上方の平面にそのビームを集光する工程とレーザ照射ポイントで材料のブレイクダウンを引き起こす工程と、試料の材料を除去あるいは改質する工程とを有する。試料の上方に焦平面を配置することは、より高強度のレーザビームパルスの使用を許容し、レーザエネルギー吸収への試料表面状態の悪影響を最小化する。二番目の面では、材料処理方法がビームによって除去された材料を、好ましくは試料表面の僅か上方に配置されたプッシュプルタイプの空気真空システムで除去するための真空を使用することをさらに含み、それによってきれいな試料と作用表面を与える。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 レーザパルスビームを発生する工程と、  
該ビームを試料表面の上方の焦平面に集光する工程と、  
レーザ照射ポイントで材料のブレイクダウンを起こす工程と、

該ビームで該試料の材料を除去あるいは改質する工程と、  
を有するパルスレーザを使用する材料処理方法。

【請求項2】 前記焦平面が試料表面の少なくとも $2\mu\text{m}$ 上に位置する請求項1の方法。

【請求項3】 前記焦平面が試料表面の $2-10\mu\text{m}$ 上に位置する請求項2の方法。

【請求項4】 前記試料材料は金属あるいは合金である請求項1の方法。

【請求項5】 前記試料材料はガラス、石英、サファイア、あるいはダイヤモンドである請求項1の方法。

【請求項6】 前記試料材料は有機材料を含む請求項1の方法。

【請求項7】 前記試料材料はケイ素を含む請求項1の方法。

【請求項8】 前記ビームは1ナノジュールより大きいパルスエネルギーをもつ請求項1の方法。

【請求項9】 レーザパルス幅を1ナノ秒から1フェムト秒の範囲に設定する工程をさらに有する請求項1の方法。

【請求項10】 前記ビームで試料から除去された材料を真空中で除去する工程をさらに有する請求項1の方法。

【請求項11】 試料から前記ビームで除去された材料をプッシュプルタイプの真空システムで除去する請求項10の方法。

【請求項12】 前記プッシュプルタイプの真空システムは、少なくとも一つの空気ジェットを発生する空気供給マニホールドと真空マニホールドとを有する請求項11の方法。

【請求項13】 前記プッシュプルタイプの真空システムは試料表面の上 $2-10\text{mm}$ に配置される請求項11の方法。

【請求項14】 レーザパルスビームを発生させる工程と、  
レーザパルス光源と試料の間に配置され且つ複数のビームを作るための複数の開口を有するマスクを通してビームを投影する工程と、  
試料表面の上方の焦平面にその複数のビームを集光する工程と、  
複数のレーザ照射ポイントで材料のブレイクダウンを起こす工程と、

その複数のビームで試料の材料を除去あるいは改質する工程と、  
を有するパルスレーザを使用する材料処理方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 発明の背景

## 1) 本発明の分野

本発明は、パルスレーザを使用する材料処理方法に関し、その材料処理は、レーザ/材料相互作用領域の材料除去あるいはレーザ/材料相互作用領域の改質を含む。特に、本発明は、材料を除去し、きれいな微細加工面にするためのパルスレーザを使った材料処理方法に関する。2) 関連技術の説明材料の内面と外面を改質することにレーザを使用することは、1997年8月12日に提出され、ミシガン州アナーバのミシガン大学の評議員に譲渡された”レーザ誘起ブレイクダウン及びアブレーションの制御法”と題する米国特許第5,656,186号(’186号特許)から知られている。

【0001】 その’186号特許は、ブレイクダウンのパワー密度閾値( $F_{th}$ )と、前もって決められた(特性の)レーザパルスビーム幅( $T$ )と、の間の関係を開示している。この特性パルス幅の値以上ではブレイクダウンのパワー密度(フルエンス)閾値( $F_{th}$ )は、パルス幅の平方根( $T^{1/2}$ )に比例して変化する。しかしながら、この依存性は、特性パルス幅の値以下の短いパルス幅では示されていない。

【0002】 特性パルス幅の値は、熱拡散長( $l_{th}$ )が吸収深さ( $1/a$ )以下になる点に一致する。ここで、 $a$ は放射に対する吸収係数である。すなわち、特性パルス幅の値以上のパルス幅の場合、熱拡散長は、吸収深さよりはるかに長くなり、その結果、熱拡散は特徴的なサイズ分解能の制限因子になる。しかしながら、特性パルス幅の値以下のパルス幅の場合は、熱拡散長が吸収深さより小さくなり、熱拡散が特徴的なサイズ分解能に影響しなくなる。

【0003】 レーザパルスが特性パルス幅の値に等しいかあるいはそれ以下のパルス幅をもつパルスレーザによる材料のレーザ誘起ブレイクダウン方法を与え、且つパルスレーザビームを材料の表面あるいは下面のポイントに集光することによって、’186号特許はこのクロスオーバーを活用している。

【0004】 しかしながら、’186号特許に開示された方法は、潜在する欠点を除いていない。たとえば、特徴的なサイズを小さくするために、レーザビーム強度は、アブレーション閾値あるいはそれに近いエネルギーを供給するように調整される。特に、アブレーション領域をこの制限領域に限定するために、レーザビームのほんの少し、たとえば、ガウスビームの中心部分がアブレーション閾値以上のパワー密度になるようにレーザビーム強度が調整される。さらに、レーザビームは損傷体積を制御するために材料の表面あるいは下面のポイントに集光される。

【0005】 したがって、従来の方法から帰結する一つの潜在的な欠点は、アブレーションした材料が加工される試料の表面に再堆積することである。アブレーションした材料に最小のエネルギーを与えるという観点で、従来

の方法はアブレーションした材料のかかりの部分にレーザー照射される主要点の上あるいは近くへ再堆積させようである。このことは二つの起こりうる問題を有している。一つは、再堆積した材料は、加工の後で除去され難いことである。さらに、この汚れはレーザービームに対して散乱あるいは吸収サイトとして働き、将来のレーザー照射に粗さをもたらす。特に、その再堆積材料は、材料除去のための不十分なエネルギーに基づいており、レーザービーム強度が閾値フルエンスぴったりあるいは近くに設定されることで与えられる。

【0006】従来の方法の2番目の起こりうる欠点は、レーザー処理される材料の表面状態への固有の依存性である。'186号特許の方法は、レーザービームを材料の表面あるいは表面下に集光する。したがって、最初のパルスの中に結合するレーザーエネルギーは、材料の初期表面状態に依存する。さらに、材料と結合するレーザーエネルギーは、以前議論した再堆積材料の悪い効果のために、次のパルスの間低下する。したがって、レーザーエネルギーの吸収は、材料の表面状態により減少する。このように、従来の方法は材料へのレーザービームエネルギーの不十分な結合と加工された部分と試料の両方に好ましくない表面粗さをもたらす。

#### 【0007】発明の目的

したがって、本発明の第1の目的は、レーザービームエネルギーの目標材料への結合を高めるパルスレーザーを使っての有効な材料処理方法を提供することである。本発明の第2の目的によって、パルス間でよりきれいな試料表面を与えることを含むよりきれいな試料表面を与えるパルスレーザーを使った材料処理の方法を提供することが求められる。

#### 【0008】本発明の要旨

本発明は、パルスレーザーを使った材料処理の方法を提供することでこれら及びその他の目的を達成する。その方法は、レーザーパルスビームを発生する工程と、そのビームを試料表面の上方の面に集光する工程と、集光レーザーポイントで材料のブレイクダウンを引き起こす工程と、試料の材料を除去あるいは改質する工程とを有する。好ましくは、その方法は、1ナノ秒から1フェムト秒( $1 \times 10^{-9}$  -  $1 \times 10^{-15}$  秒)の範囲のパルス幅をもつレーザーパルスビームを発生する工程と、試料の表面の少なくとも2  $\mu\text{m}$ 上方に焦平面を配置する工程とを有する。より好ましくは、実際問題として、焦平面は試料表面の上方2 - 10  $\mu\text{m}$ に位置する。第2の実施形態は、レーザーで除去された材料を真空を使って除去する工程をさらに有する。好ましくは、その真空除去は、プッシュプルタイプの空気真空システムで行われる。より好ましくは、その真空システムは、試料表面の僅かに上方に配置される。

#### 【0009】好ましい実施形態の詳細説明

図1は、本発明によるパルスレーザーを使った材料処理の

方法を図解している。パルスレーザービーム1は、試料3の表面4の上方の平面2に集光され、集光レーザー照射ポイント6で材料のブレイクダウンを引き起こす。試料の材料例は、金属及び合金と、セラミックスと、ガラス、石英、サファイア及びダイヤモンドのような透明材料と、ポリイミド及びPMMAのような有機材料と、シリコンと、を含むが、限定されない。

【0010】好ましくは、レーザーパルスのビーム1は、1ナノ秒~1フェムト秒( $1 \times 10^{-9}$  ~  $1 \times 10^{-15}$  秒)の範囲のパルス幅をもって発生される。この範囲内のパルス幅を発生させることが出来るレーザーは既知であり、'186号特許に開示されたTi:サファイアレーザーを含む。そのような急速な時間スケールは低エネルギーレベルで有利であり、ピコ秒からフェムト秒のレーザーパルスは、レーザー照射ポイント6からの材料除去なしで非平衡過程をもたらすために使用される。こういう風に改質される物理特性の一例は結晶構造で、たとえば結晶からアモルファスになる。

【0011】より好ましくは、レーザービーム強度は、ビーム1が焦平面2で試料表面4での強度分布の対応する部分のみがフルエンス閾値以上になるようなフルエンス閾値以上の小部分をもつ強度分布をもつように、調整される。ここで、試料表面4での強度分布の対応する部分は、閾値フルエンスのほんの僅か上である。

【0012】本発明は試料3の表面4をレーザービーム1の焦平面2の下方に配置する。好ましくは、焦平面2は試料表面4の上方2、3ミクロンより大きく離れた位置に配置される。この構成は、試料表面4でのビーム強度が低いので、より高い強度のレーザービームパルスの使用を許容する。試料表面4でのレーザービーム強度は、ビーム強度分布に対する良く知られた式を使って計算される。

【0013】焦平面2と試料3の間隔が大きくなるほど、試料3から材料を除去するあるいは改質するために、焦平面2でのレーザービーム強度は大きくなければならない。しかしながら、焦平面2と試料3の間隔を大きくすると、試料表面4でのレーザービーム1の強度分布が広げられる。'186号特許からわかるように、精密な加工を行うためにはビーム強度は、レーザー照射ポイントでのビーム分布の小さい部分だけがフルエンス閾値以上のエネルギーをもつように、調整されなければならない。このように、焦平面2は試料表面4のはるか上方に位置することができない、そうしないと、精密な加工が行われない。したがって、小さな(すなわちスポットサイズより小さな)作用サイズが必要なときは、焦平面2と試料表面4の間の距離は小さくなければならない。

【0014】レーザービームの焦平面2と試料3の間の距離の範囲は、レーザービーム1を次の条件で動作させることで、きれいな試料と作用表面をもつ精密な加工を与える。第1に、焦平面2は好ましくは試料表面の2~3ミ

10

20

30

40

50



クロン上方より大きい距離に配置される。より好ましくは、レーザビームの焦平面2は試料表面4の上方2-10ミクロンに配置される。さらに、レーザパルスは、好ましくは1ナノ秒から1フェムト秒( $1 \times 10^{-9}$  -  $1 \times 10^{-15}$  秒)の範囲のパルス幅をもつ。さらに、パルス当たりのビームエネルギーは、好ましくは1ナノジュール( $1 \times 10^{-9}$  J)より大きい。

【0015】本発明の第2の実施形態が図2に示されている。パルスレーザビーム1は試料3の表面4の上方の平面に集光され、レーザ照射ポイント6で材料のブレイクダウンを起こす。試料3から除去された材料は真空中で除去される。真空中で材料を除去することで、アブレーションした材料の大部分がレーザ照射された作用部6の上あるいは付近へ再堆積することが避けられる。こういう風に、よりきれいな試料と作用表面が得られる。

【0016】好ましくは、真空除去は試料表面4の僅か上方に配置されたプッシュプルタイプの空気真空システムで行われる。真空システムと試料表面4を、試料表面4を物理的に損傷することなしに、できるだけ近づけることが好ましい。好ましくは、真空システムと試料表面4とは2-3ミリメートルの距離離される、より好ましくは、2-10ミリメートル離される。

【0017】プッシュプルタイプの空気真空システムが図2に模式的に描画されている。空気が圧縮空気を供給する空気供給マニホールド11で供給され、それによって除去材料をレーザ照射された作用部6から残滓を吸い込む真空マニホールド12の方にプッシュし、それによってよりきれいな試料及び作用表面が得られる。そのようなシステムは技術的に良く知られており、したがって詳しくは説明されない。

【0018】レーザ-材料相互作用領域の最大清浄化を達成するために、圧縮空気圧と真空圧は好ましくは与えられたセットの材料とレーザ処理パラメータに対して調整される。さらに、空気供給マニホールド11の端部11aは試料3にある角度(図示せず)で空気を供給するように設計される。さらに、残滓除去を高めるために、ノズルあるいは類似の構造の造作(図示せず)が空気のジェットあるいは多数ジェットを作るべき空気供給マニホールド11の端部11aに取り付けられる。さらに、真空マニホールド12の端部12aは好ましくは、圧縮

空気で持ち上げられた残滓の最大量がレーザ-材料相互作用領域から捕獲され運び去られるように、形付けられる。

【0019】この材料処理の方法は、試料表面4の上方にレーザビームを集光することで、材料表面状態のレーザエネルギー吸収への様々な悪影響が最小化されるということに優位性がある。さらに、プッシュプルタイプの空気真空システムの使用は、次のレーザパルスに対してきれいな試料表面を提供する。このように全体的に、現在の方法は、レーザビームの最も強い部分と試料表面4との相互作用を避けて、それによってレーザエネルギーをより効率的に使用する。

【0020】本発明の第3の実施形態が図3に描画されている。パルスレーザビーム1は、レーザパルス光源(図示せず)と試料3の間に配置されているマスク20を通して投影される。マスク20は複数の開口21をもち、その開口を通して複数のビーム22が形成される。マスク投影技術は既知であり且つより詳細には議論されていない。複数のビーム22は試料3の表面4の上方の焦平面に集光され、複数のレーザ照射ポイント6で材料のブレイクダウンを引き起こし試料3の除去あるいは改質を行う。

【0021】上記の好ましい実施形態は、例として与えられている。この開示から、その技術に通じるものが本発明とその付随する改良を理解するのみならず、開示された構造への見かけの様々な変化及び変更を見出すであろう。したがって、添付のクレーム及びそれと同等のもので定義されたように、本発明の精神と範囲に入るようなあらゆる変化及び変更をカバーすることが求められる。

#### 【図面の簡単な説明】

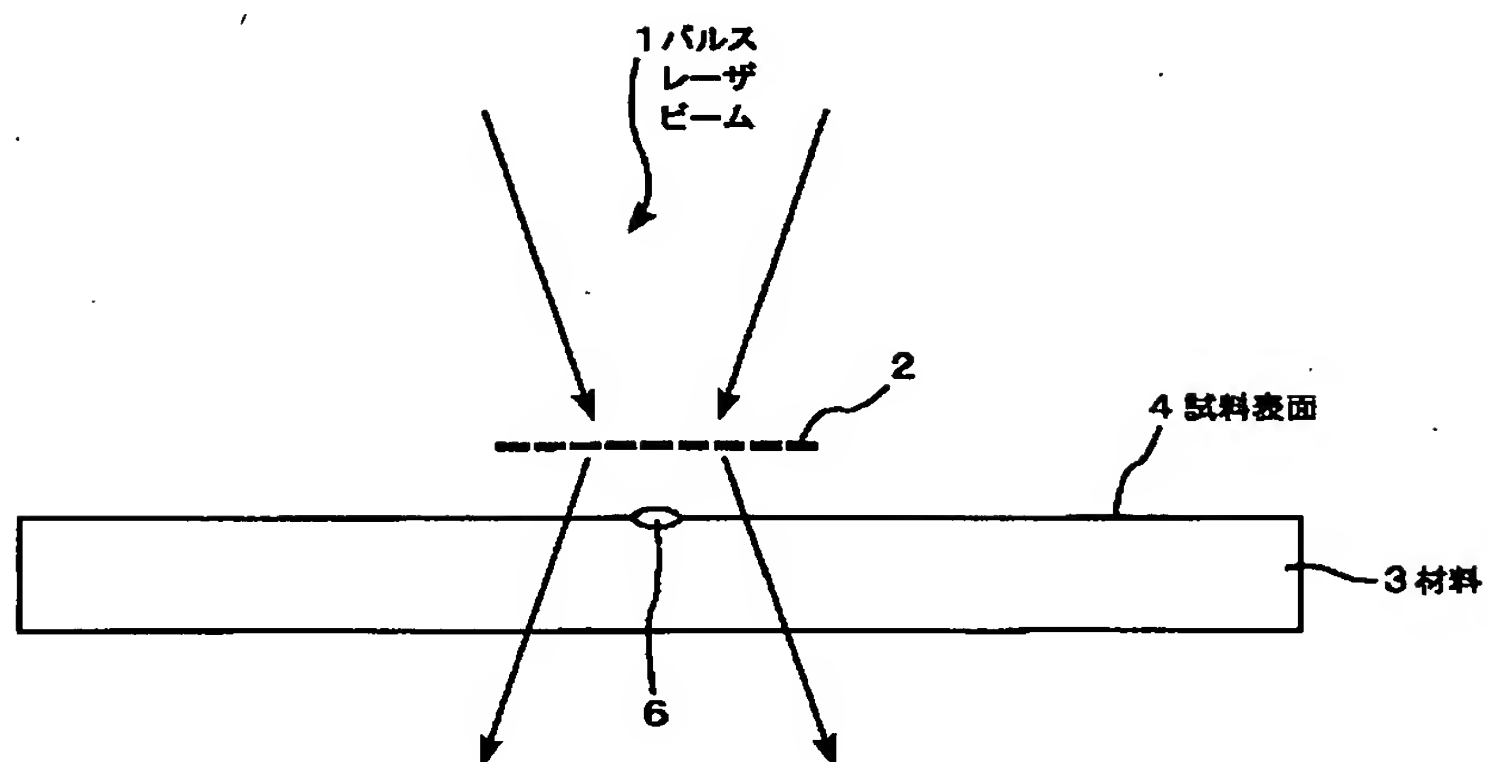
本発明の上記目的と優位性は、その好ましい実施形態を以下の添付図に関して詳細に説明することでより明白になるであろう：

【図1】本発明の第1の実施形態によるパルスレーザを使用する材料処理の概略図であり；

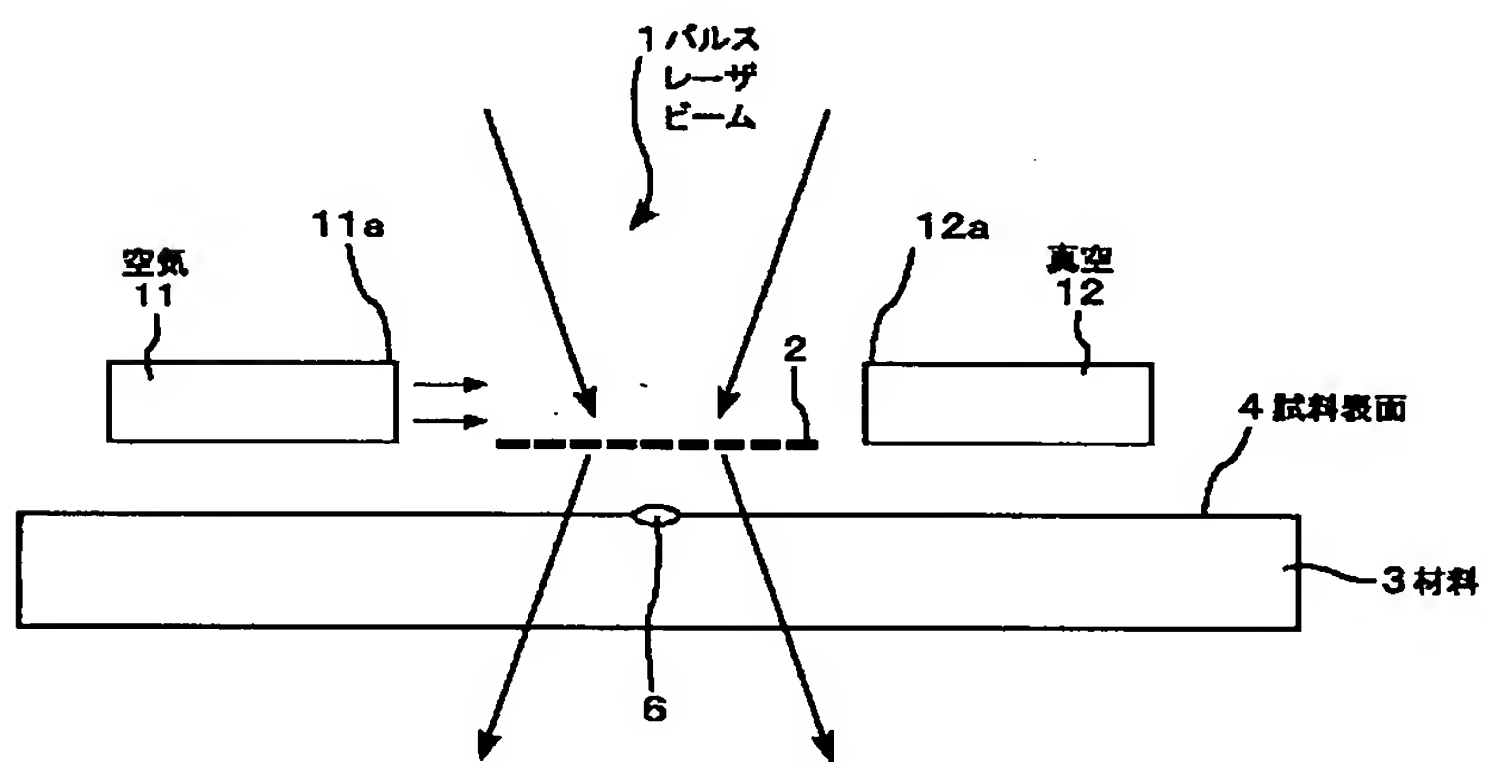
【図2】レーザ照射で除去された材料の真空除去を含むパルスレーザを使用する材料処理の概略図であり；

【図3】試料表面に複数のレーザビームを投影するためのマスクの概略図である。

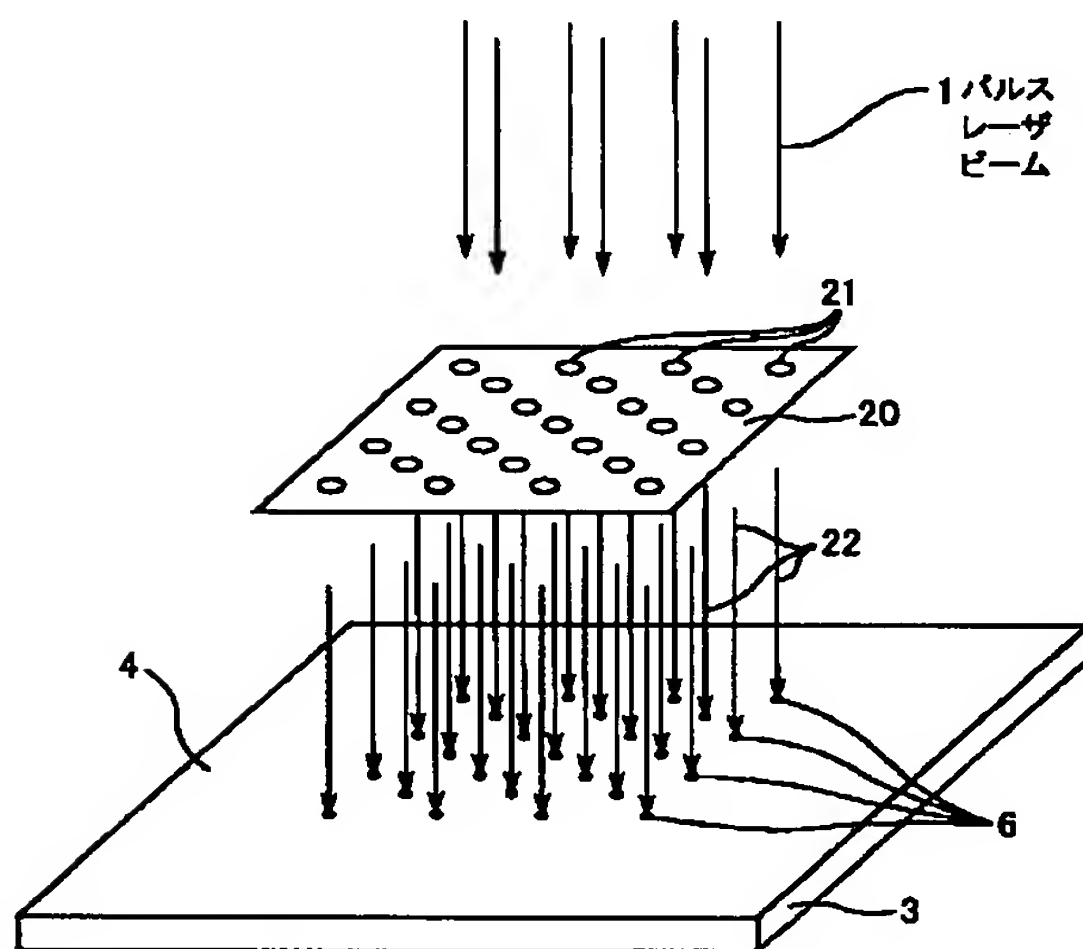
【図1】



【図2】



【図3】



【外国語明細書】

## 1. Title of Invention

### METHOD OF LASER CONTROLLED MATERIAL PROCESSING

## 2. Claims

1. A method for material processing using a pulsed laser comprising:  
generating a beam of laser pulses;  
focusing said beam in a focal plane above a surface of a workpiece;  
causing breakdown of matter at a lasing point; and  
removing or modifying material of the workpiece by said beam.
2. The method of Claim 1, wherein said focal plane is at least 2  $\mu\text{m}$  above the surface of the workpiece.
3. The method of Claim 2, wherein said focal plane is 2-10  $\mu\text{m}$  above the surface of the workpiece.
4. The method of Claim 1, wherein the workpiece material is a metal or an alloy.
5. The method of Claim 1, wherein the workpiece material is glass, quartz, sapphire, or diamond.
6. The method of Claim 1, wherein the workpiece material comprises an organic material.
7. The method of Claim 1, wherein the workpiece material comprises silicon.
8. The method of Claim 1, wherein said beam has a pulse energy greater than one nanojoule.
9. The method of Claim 1, further comprising:  
setting a laser pulse width in a range of one nanosecond to one femtosecond.
10. The method of Claim 1, further comprising:  
removing material removed from the workpiece by said beam by vacuum.

11. The method of Claim 10, wherein a push-pull type vacuum system removes the material removed from the workpiece by said beam.

12. The method of Claim 11, wherein said push-pull type vacuum system comprises an air supply manifold, producing at least one jet of air, and a vacuum manifold.

13. The method of Claim 11, wherein said push-pull type vacuum system is located 2-10 mm above the workpiece surface.

14. A method for material processing using a pulsed laser comprising:  
generating a beam of laser pulses;  
projecting the beam through a mask, which is positioned between a laser pulse source and a workpiece and comprises a plurality of openings to form a plurality of beams;  
focusing the plurality of beams in a focal plane above a surface of the workpiece;  
causing breakdown of matter at a plurality of lasing points; and  
removing or modifying material of the workpiece by the plurality of beams.

### 3. Detailed Description of Invention



## **BACKGROUND OF THE INVENTION**

### **1. FIELD OF THE INVENTION:**

The present invention relates to a method for material processing using a pulsed laser, where the material processing may include removal of material at the laser/material interaction site or may involve changing properties of a material at the laser material/interaction site. In particular the present invention relates to a method for material processing using a pulsed laser to remove material and leave a clean micromachined surface.

### **2. DESCRIPTION OF THE RELATED ART:**

Use of a laser to modify internal and external surfaces of materials is known from U.S. Patent No. 5,656,186 (the '186 patent), entitled "Method for Controlling Configuration of Laser Induced Breakdown and Ablation," issued August 12, 1997 and assigned to the Regents of the University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.

The '186 patent discloses a relationship between fluence breakdown threshold ( $F_{th}$ ) and laser pulse beam width ( $T$ ) that exhibits a distinct change in slope at a predetermined (characteristic) laser pulse width value. Above this characteristic pulse width value, the fluence breakdown threshold ( $F_{th}$ ) varies as the square root of the pulse width ( $T^{1/2}$ ). However, this dependency is not exhibited at short pulse widths below the characteristic pulse width value.

The characteristic pulse width value corresponds to the point at which the thermal diffusion length ( $l_{th}$ ) becomes smaller than the absorption depth ( $1/a$ ), where  $a$  is the absorption coefficient for the radiation. Namely, for pulse widths above the characteristic pulse width value, the thermal diffusion length is much longer than the absorption depth, resulting in thermal diffusion being the limiting factor for feature size resolution. However,

for pulse widths below the characteristic pulse width value, the thermal diffusion length is smaller than the absorption depth such that thermal diffusion does not affect feature size resolution.

The '186 patent exploits this crossover, by providing a method for laser induced breakdown of a material with a pulsed laser in which the laser pulses have a pulse width equal to or less than the characteristic pulse width value, and focusing the pulsed laser beam to a point at or beneath the surface of the material.

However, the method disclosed in the '186 patent is not without potential shortcomings. For example, in order to reduce the feature size, laser beam intensity is adjusted to provide energies at or near the threshold for ablation. Specifically, laser beam intensity is adjusted such that in only a small fraction of the laser beam, e.g. the central portion of a gaussian beam, is the fluence greater than the ablation threshold, in order to restrict the ablated region to this limited area. In addition, the laser beam is focused to a point at or beneath the surface of the material, in order to control the damaged volume.

Accordingly, one potential shortcoming resulting from the prior art method is redeposition of the ablated material on the surface of the piece being machined. In view of the minimal energy imparted to the ablated material, the prior art method is likely to result in the redeposition of a substantial portion of the ablated material on or near the feature being lased. This poses two possible problems. First, the redeposited material may be difficult to remove after machining. Moreover, this contamination may act as scattering or absorption sites for the laser beam, causing roughness in future lasing. Specifically, the redeposited material may result in insufficient energy to remove material, given that the laser beam intensity is set right at or near the threshold fluence.

A second potential shortcoming of the prior art method is its inherent dependency on the surface conditions of the material being lased. The method of the '186 patent focuses the

laser beam at or beneath the surface of the material. Consequently, the laser energy coupling during the first pulse depends on the initial surface condition of the material. Furthermore, laser energy coupling with the material may degrade during subsequent laser pulses because of the previously discussed ill effects of redeposited material. Accordingly, laser energy absorption may be reduced due to material surface conditions. Thus, the prior art method may result in both inefficient coupling of the laser beam energy into the material and undesirable roughness of surfaces of both the feature and workpiece.

### **OBJECTS OF THE INVENTION**

Accordingly, one object of the present invention is to provide a method for efficiently processing material using a pulsed laser that enhances the coupling of laser beam energy into the target material. According to a second object of the present invention, it is sought to provide a method for material processing using a pulsed laser that provides a cleaner workpiece surface, including providing a cleaner workpiece surface between pulses.

### **SUMMARY OF THE INVENTION**

The present invention achieves these and other objectives by providing a method for material processing using a pulsed laser. The method includes generating a beam of laser pulses, focusing the beam in a plane above a surface of a workpiece, causing breakdown of matter at a focused lasing point, and removing or modifying material of the workpiece. Preferably, the method includes generating a beam of laser pulses with pulse widths in the range of one nanosecond to one femtosecond ( $1 \times 10^{-9}$  -  $1 \times 10^{-15}$  seconds) and positioning the focal plane at least 2  $\mu\text{m}$  above the surface of the workpiece. More preferably, in practice the focal plane is positioned 2-10  $\mu\text{m}$  above the surface of the workpiece.

A second embodiment further includes removing the material removed by lasing using vacuum. Preferably, the vacuum removal is performed by a push-pull type air vacuum system. More preferably, the vacuum system is located slightly above the workpiece surface.

**DETAILED DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS**

Figure 1 illustrates a method for processing material using a pulsed laser according to the present invention. A pulsed laser beam 1 is focused in a plane 2 above a surface 4 of a workpiece 3 causing breakdown of matter at a focused lasing point 6. Examples of workpiece materials include, but are not limited to, metals and alloys, ceramics, transparent materials such as glass, quartz, sapphire, and diamond, organic materials such as polyimide, and PMMA, and silicon.

Preferably, a beam 1 of laser pulses is generated with pulse widths in the range of one nanosecond to one femtosecond ( $1 \times 10^{-9}$  -  $1 \times 10^{-15}$  seconds). Lasers capable of producing pulse widths within this range are known and include a Ti:Sapphire laser disclosed in the '186 patent. Such fast time scales are advantageous, in that at low energy levels, picosecond

to femtosecond laser pulses can be used to effect nonequilibrium processes, without removing material from the lasing point 6. One example of a physical property that can be modified in this manner is crystal structure, e.g., going from a crystal to an amorphous structure.

More preferably, the laser beam intensity is adjusted such that the beam 1 has an intensity profile in its focal plane 2 having a small portion thereof greater than the fluence threshold such that only a corresponding portion of the intensity profile at the workpiece surface 4 is above the fluence threshold, where the corresponding portion of the intensity profile at the workpiece surface 4 is just barely above the threshold fluence.

The present invention positions the surface 4 of the workpiece 3 below the focal plane 2 of the laser beam 1. Preferably, the focal plane 2 is positioned a distance greater than a few microns above the workpiece surface 4. More preferably, the focal plane 2 of the laser beam is 2-10 microns above the workpiece surface 4. This configuration permits the use of higher intensity laser beam pulses because the beam intensity at the workpiece surface 4 will be lower. The laser beam intensity at the workpiece surface 4 can be calculated using well known formulas for beam intensity distributions.

Accordingly, the greater the distance between the focal plane 2 and the workpiece 3, the greater the laser beam intensity must be at the focal plane 2, in order to remove or modify material from the workpiece 3. However, by increasing the distance between the focal plane 2 and the workpiece 3, the intensity distribution of the laser beam 1 at the workpiece surface 4 is broadened. As is known from the '186 Patent, the beam intensity should be adjusted such that only a small fraction of the beam profile at the lasing point should have energies above the fluence threshold, in order to achieve precision machining. Thus, the focal plane 2 cannot be positioned too far above the workpiece surface 4, or else precision machining cannot be achieved. Accordingly, when small feature sizes are required (i.e., considerably smaller than



the spot size), the distance between the focal plane 2 and the workpiece surface 4 should be small.

A range of distances between the focal plane 2 of the laser beam and the workpiece 3 provides precision machining with clean workpiece and feature surfaces, by operating a laser beam 1 under the following conditions. First, the focal plane 2 is preferably positioned a distance greater than a few microns above the workpiece surface 4. More preferably, the focal plane 2 of the laser beam is positioned 2-10 microns above the workpiece surface 4. In addition, the laser pulses preferably have pulse widths in the range of one nanosecond to one femtosecond ( $1 \times 10^{-9}$  -  $1 \times 10^{-15}$  seconds). Further, the beam energy per pulse is preferably greater than one nanojoule ( $1 \times 10^{-9}$  Joule).

A second embodiment of the present invention is shown in Figure 2. A pulsed laser beam 1 is focused in a plane above a surface 4 of a workpiece 3 causing breakdown of matter at a lasing point 6. Material removed from the workpiece 3 is then removed by vacuum. By removing the material by vacuum, the redeposition of a substantial portion of the ablated material on or near the feature being lased 6 can be avoided. In this manner, cleaner workpiece and feature surfaces are provided.

Preferably, the vacuum removal is performed by a push-pull type air vacuum system, which is located slightly above the workpiece surface 4. It is preferable to position the vacuum system and workpiece surface 4 as close as is possible without physically damaging the workpiece surface 4. Preferably, the vacuum system and the workpiece surface 4 are separated by a distance of a few millimeters, and more preferably, by 2-10 millimeters.

A push-pull type air vacuum system is illustrated schematically in Figure 2. Air is supplied by an air supply manifold 11, which supplies compressed air, thereby pushing the removed material toward a vacuum manifold 12, which sucks the debris away from the

feature being lased 6, thereby providing cleaner workpiece and feature surfaces. Such systems are well known in the art, and consequently, will not be described in detail.

In order to achieve maximal cleaning of the laser-material interaction area, the compressed air pressure and vacuum pressure are preferably adjusted for a given set of material and laser processing parameters. Furthermore, an end 11a of the air supply manifold 11 can be designed to supply air at an angle (not shown) to the workpiece 3. In addition, a nozzle or comparable structural feature (not shown) can be attached to the end 11a of the air supply manifold 11 to create a jet or multiple jets of air, in order to enhance debris removal. Moreover, an end 12a of the vacuum manifold 12 is preferably configured such that the maximum amount of debris lifted away by the compressed air can be trapped and carried away from the laser-material interaction area.

This method of material processing is advantageous in that, by focusing the laser beam above the workpiece surface 4, the various ill effects of material surface conditions on the laser energy absorption are minimized. In addition, use of a push-pull type air vacuum system provides a cleaner workpiece surface for subsequent laser pulses. Thus overall, the present method avoids direct interaction of the most intense portion of the laser beam with the workpiece surface 4, thereby utilizing laser energy more efficiently.

A third embodiment of the present invention is illustrated in Figure 3. A pulsed laser beam 1 is projected through a mask 20, which is positioned between a laser pulse source (not shown) and a workpiece 3. The mask 20 includes a plurality of openings 21 through which a plurality of beams 22 are formed. Mask projection techniques are known and thus are not discussed in more detail. The plurality of beams 22 are focused in a focal plane above a surface 4 of the workpiece 3, causing breakdown of matter at a plurality of lasing points 6 and removal or modification of the material of the workpiece 3.

The above description of the preferred embodiments has been given by way of example. From the disclosure given, those skilled in the art will not only understand the present invention and its attendant advantages, but will also find apparent various changes and modifications to the structures disclosed. It is sought, therefore, to cover all such changes and modifications as fall within the spirit and scope of the invention, as defined by the appended claims, and equivalents thereof.

#### 4. Brief Description of Drawings

##### **BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS**

The above objectives and advantages of the present invention will become more apparent by describing in detail preferred embodiments thereof with reference to the attached drawings, in which:

FIGURE 1 is a schematic illustration of material processing using a pulsed laser according to a first embodiment of the present invention;

FIGURE 2 is a schematic representation of material processing using a pulsed laser including vacuum removal of the material removed by lasing; and

FIGURE 3 is a schematic illustration of a mask for projecting a plurality of laser beams onto a workpiece surface.

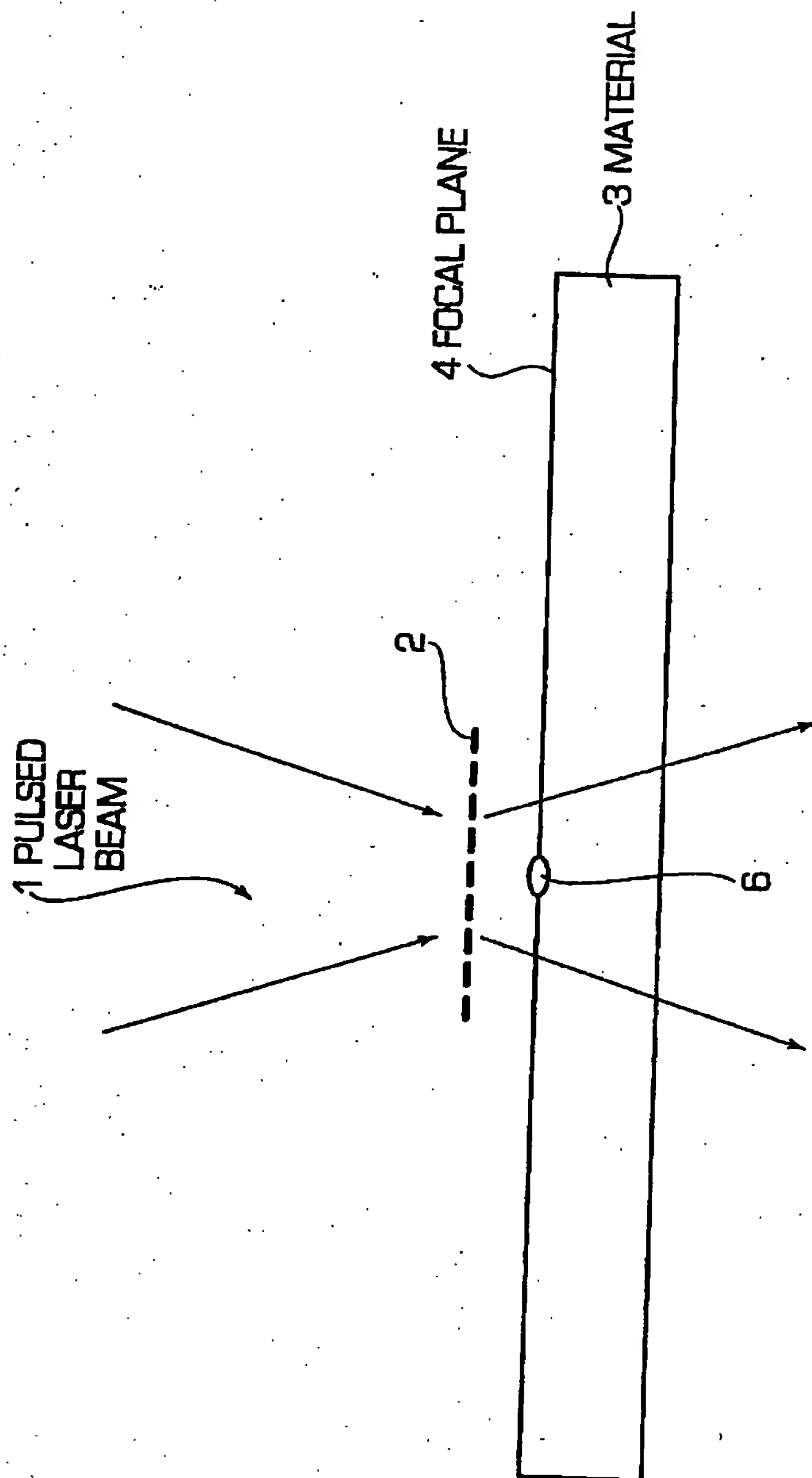


FIG. 1

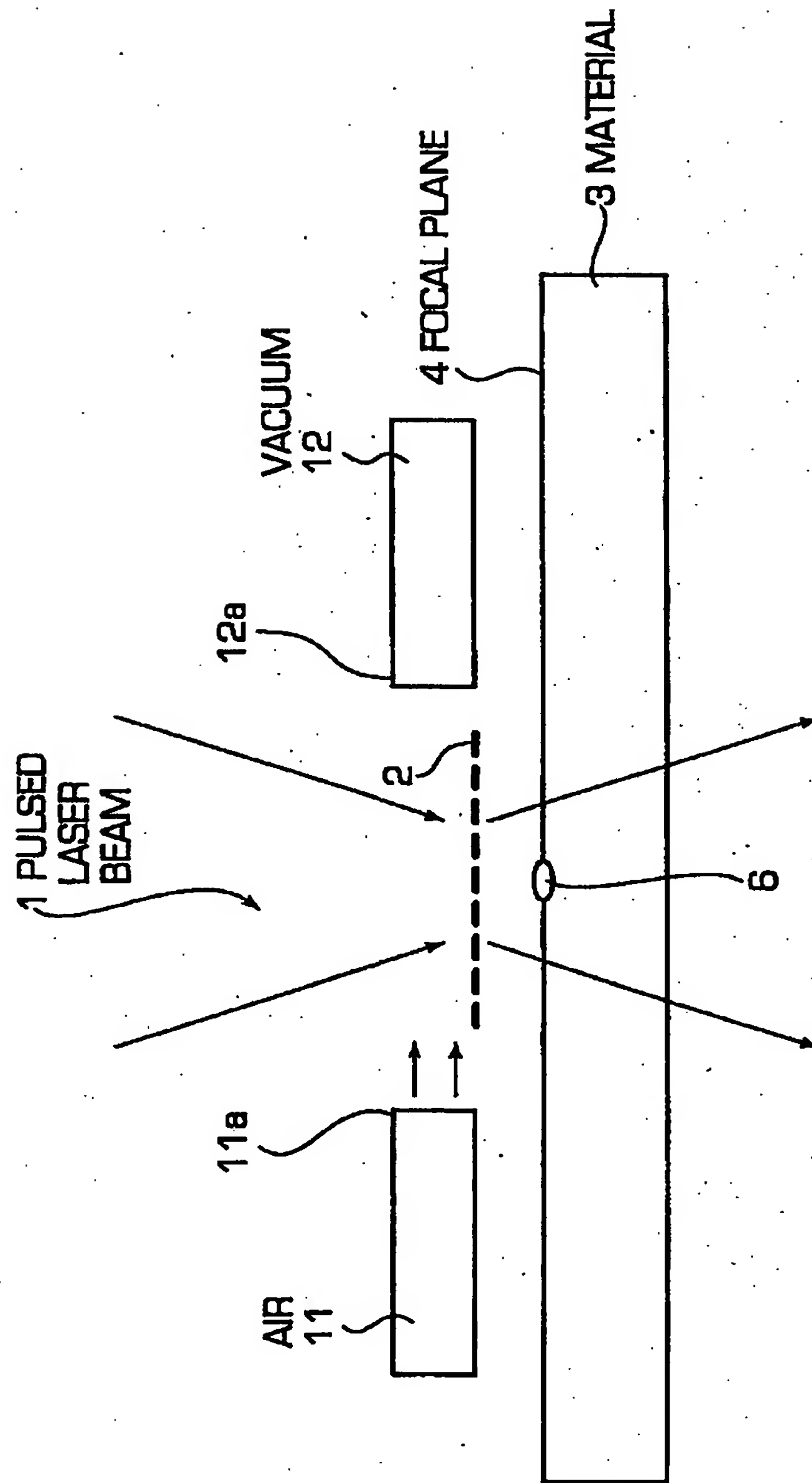
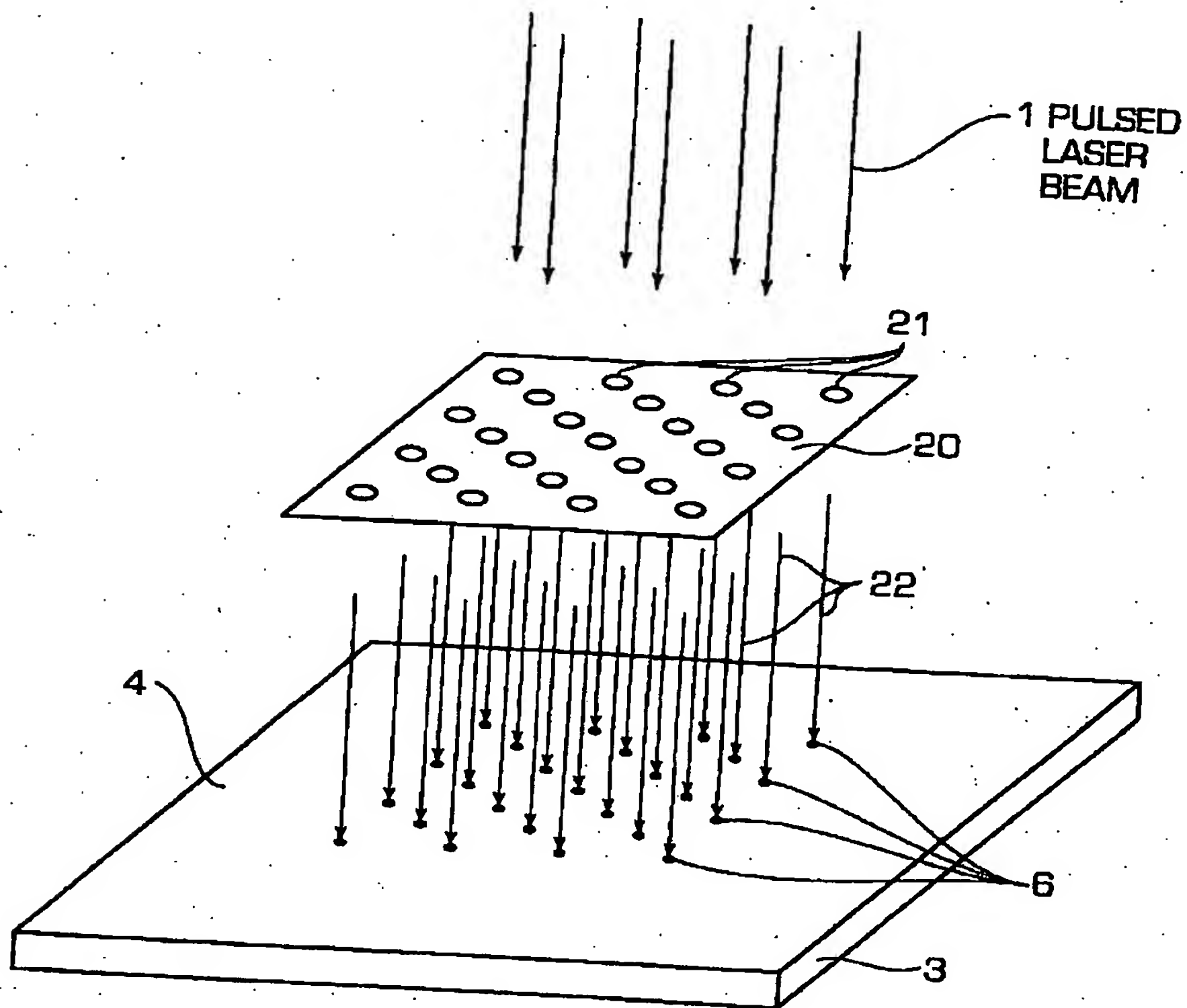


FIG. 2



FIG. 3



## 1. Abstract

ABSTRACT

A method for material processing using a pulsed laser includes generating a beam of laser pulses, focusing the beam in a plane above the surface of a workpiece, causing breakdown of matter at a lasing point, and removing or modifying material of the workpiece. Positioning the focal plane of the laser above the workpiece permits the use of higher intensity laser beam pulses and minimizes ill effects of workpiece surface conditions on laser energy absorption. In a second aspect, a method for material processing further includes using vacuum to remove the material removed by the beam, preferably by a push-pull type air vacuum system located slightly above the workpiece surface, thereby providing cleaner workpiece and feature surfaces.

## 2. Representative Drawing

F i g . 1